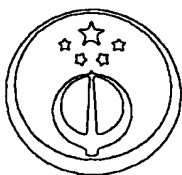


21

[19]中华人民共和国专利局

[51]Int.Cl⁶

H01S 3/18



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 97109946.4

[43]公开日 1997年12月31日

[11] 公开号 CN 1169047A

[22]申请日 97.3.28

[30]优先权

[32]96.3.28 [33]JP[31]74737/96

[32]96.9.30 [33]JP[31]259648/96

[71]申请人 三洋电机株式会社

地址 日本国大阪府

[72]发明人 林伸彦 井手大辅 茨木晃

[74]专利代理机构 上海专利商标事务所

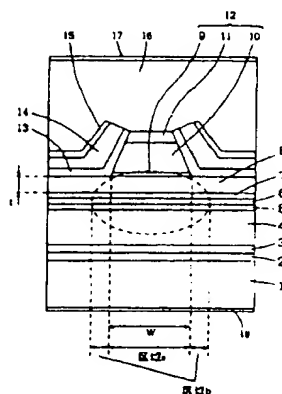
代理人 徐 泰

权利要求书 5 页 说明书 19 页 附图页数 8 页

[54]发明名称 半导体激光器件及其设计方法

[57]摘要

一种半导体激光器件包括第一导电型衬层、有源层、第二导电型衬层和电流阻挡层。设定有效折射率之差值 Δn 和开口宽度 $W[\mu m]$,使之满足一预定关系。通过选择电流阻挡层的Al的组分比和开口两侧第二导电型衬层的厚度,可设定实折射率之差值 Δn 。



(BJ)第 1456 号

步骤，以便满足以下关系：

$$W \leq 2.25 \times 10^3 \times \Delta n^{-3.175}$$

这样，就获得一种水平光束发散角不小于 7° 的半导体激光器件。

第二导电型敷层可包括一平坦部分和在其上面的条状脊形部分。脊形部分可定位于电流阻挡层的开口内，而且如此形成电流阻挡层以覆盖住平坦部分的上表面和脊形部分的侧表面。这样，就可提供一种所谓的脊波导型半导体激光器件。在离有源层某一距离处，脊形部分宽度可随距离的增大而减小。

通过下面结合附图对本发明所作的详细介绍，本发明的上述目的和其它目的、特征、方面和优点就更清楚了。

图 1 是根据本发明第一实施例的半导体激光器件的剖面示意图；

图 2 是表示有效折射率差值 Δn 与图 1 所示半导体激光器件中可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 P_k 之间的关系曲线；

图 3 示出在图所示半导体激光器件中，有效折射率差值 Δn 、可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 P_k 以及条宽 W 之间的关系曲线；

图 4 是根据本发明第二实施例的半导体激光器件的剖面示意图；

图 5 表示图 4 所示半导体激光器件中有源层的示意的能带结构及附近状况的图；

图 6 表示图 4 所示半导体激光器件中，有效折射率差值 Δn 、可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 P_k 、条宽 W 及水平光束发散角 θ_H 之间的关系曲线；

图 7 表示图 4 所示半导体激光器件中条宽 W 与 COD（突然光学损坏）之间的关系曲线；以及

图 8 表示图 4 所示半导体激光器件中有效折射率差值 Δn 与像散性之间的关系曲线。

运用图 1 说明根据本发明第一实施例的一种 AlGaAs 系半导体激光器件。

在图 1 中，在 n 型 GaAs 衬底 1 上依次形成 $0.5\mu\text{m}$ 厚 Se 掺杂 n 型 GaAs 缓冲层 2、 $0.1\mu\text{m}$ 厚 Se 掺杂 n 型 $\text{Al}_s\text{Ga}_{1-s}\text{As}$ 缓冲层 3 和 $2.3\mu\text{m}$ 厚 Se 掺杂 n 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 敷层 4，其中 $x>s>0$ 。在本发明实施例中， $s=0.18$ ， $x=0.45$ 。

在 n 型敷层 4 上依次形成 410A 厚非掺杂 $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$ 光波导层 5、100A 厚由 $\text{Al}_q\text{Ga}_{1-q}\text{As}$ 组成的具有单量子阱结构的非掺杂有源层 6 以及 410A 厚非掺杂 $\text{Al}_w\text{Ga}_{1-w}\text{As}$ 光波导层 7, 其中 $1 > x > v$, $v > q \geq 0$, $w > q \geq 0$, $y_1 > w$, $y_2 > w$. 在本发明实施例中, $v=0.35$, $q=0.035$, $w=0.35$.

5 在光波导层 7 上形成 $t\mu\text{m}$ 厚 Zn 掺杂 p 型 $\text{Al}_{y_1}\text{Ga}_{1-y_1}\text{As}$ 敷层 8. 在本发明实施例中, $y_1=0.45$.

在 p 型敷层 8 的靠近中央部分上面, 依次形成沿垂直方向 (沿腔体长度方向) 延伸厚为 200A 的条形 Zn 掺杂 p 型 $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u}\text{As}$ 蚀刻阻止层 9、 $2\mu\text{m}$ 厚条形 Zn 掺杂 p 型 $\text{Al}_{y_2}\text{Ga}_{1-y_2}\text{As}$ 敷层 10 和 $0.4\mu\text{m}$ 厚条形 Zn 掺杂 p 型 GaAs 盖层 (cap layer) 11. p 型蚀刻阻止层 9 的宽度为 $W\mu\text{m}$, 宽度 $W\mu\text{m}$ 变为形成电流路径的开口宽度. 这里, $1 \geq u > y_1$, $1 \geq u > y_2$. 在本发明实施例中, $u=0.7$, $y_2=0.45$. p 型蚀刻阻止层 9、p 型敷层 10 和 p 型盖层 11 构成了条状脊形部分 12.

在 p 型敷层 8 上面依次形成 $0.3\mu\text{m}$ 厚非掺杂 $\text{Al}_{z_1}\text{Ga}_{1-z_1}\text{As}$ 电流阻挡层 13、 $0.2\mu\text{m}$ 厚 Se 掺杂 n 型 $\text{Al}_{z_2}\text{Ga}_{1-z_2}\text{As}$ 电流阻挡层 14 和 $0.3\mu\text{m}$ 厚 Se 掺杂 n 型 GaAs 电流阻挡层 15, 使之覆盖住脊形部分 12 的侧表面, 其中 $1 \geq z_1 > y_1$, $1 \geq z_1 > y_2$, $1 \geq z_2 > y_1$, $1 \geq z_2 > y_2$.

$6\mu\text{m}$ 厚 Zn 掺杂 p 型 GaAs 接触层 16 形成在 p 型盖层 11 的上表面、非掺杂电流阻挡层 13 的端面、n 型电流阻挡层 14 的端面以及 n 型电流阻挡层 15 的上表面与端面上.

在 p 型接触层 16 上形成由 Cr/Au 组成的 p 侧电极 17, 并在 n 型衬底 1 的下表面上形成由 Cr/Sn/Au 组成的 n 侧电极 18.

现在举例说明制造上述半导体激光器件的方法.

首先, 运用诸如金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 法或分子束外延 (MBE) 法之类的气相外延 (VPE) 方法, 在 n 型 GaAs 衬底 1 上连续生长 n 型 GaAs 缓冲层 2、n 型 AlGaAs 缓冲层 3、n 型 AlGaAs 敷层 4、非掺杂 AlGaAs 光波导层 5、非掺杂有源层 6、非掺杂 AlGaAs 光波导层 7、p 型 AlGaAs 敷层 (平坦部分) 8、p 型 AlGaAs 或 AlAs 蚀刻阻止层 9、p 型敷层 (对应于以后形成的脊形部分) 10 以及 p 型 GaAs 盖层 11. p 型盖层 11 是保护层, 防止在制造过程中在 p 型敷层 10 上用暴露和氧化 p 型敷层 10 的办法作晶体生长的不可行性.

然后, 在 p 型 GaAs 盖层 11 上形成条形 SiO_2 膜, 并用 SiO_2 膜作为掩

模有选择地蚀刻掉 p 型蚀刻阻止层 9 下面的层，之后，用 SiO_2 膜作为掩模再蚀刻掉蚀刻阻止层 9 以形成脊形部分 12。由于蚀刻阻止层 9 的 Al 的组分比很大，所以难以在蚀刻步骤之后在蚀刻阻止层 9 上生长出结晶性很好的晶体。因此，在本发明实施例中去除了蚀刻阻止层 9。

5 接着，运用上述的气相外延法在敷层 8 上依次连续生长电流阻挡层 13、14 和 15，使之覆盖住脊形部分 12 的侧表面，露出盖层 11 的上表面。此后，运用上述的气相外延法在电流阻挡层 13、14 与 15 以及盖层 11 的上表面上生长 p 型 GaAs 接触层 16。

10 在半导体激光器件中，具有条形开口（条宽为 W ）以便限制电流路径并形成该电流路径的电流阻挡层 13 和 14 同 p 型敷层 8 和 10 相比，其带隙更大而折射率较小。因此，在发光区（图 1 中用虚线椭圆示意地表示的区域）中，对应于开口的区域 a 内的有效折射率可以做得比对应于开口两侧的区域 b 内的有效折射率更大。所以半导体激光器件可以像有效折射率导向型半导体装置那样地工作。有效折射率差值表示在区域 a
15 检测到的具有激光波长的光的折射率与在区域 b 检测到的光的折射率之差。

运用上述结构，电流阻挡层 13 和 14 就成了透明的电流阻挡层，它对激光光线呈透明。

20 通过选择电流阻挡层 13 和 14 各自的 Al 的组分比 z_1 与 z_2 或者敷层 8 的厚度 t ，来改变半导体激光器件不工作时的有效折射率的差值（对应于开口的区域 a 内的有效折射率减去对应于开口两侧的区域 b 内的有效折射率），以测量基本横向模激光的最大光输出功率，其结果示于图 2。在这种情况下，在半导体激光器件的前后面分别配上反射率为 2 % 和 95 % 的反射膜，腔体长度设定为 $1200\mu\text{m}$ ，在 25°C 环境温度下进行测量。
25 表 1 列出了电流阻挡层 13 和 14 各自的 Al 的组分比 z_1 和 z_2 以及图 2 所示各点的 p 型敷层 8 的厚度 t 。编号 A1 - A5 的样品条宽为 $4.5\mu\text{m}$ 。

表 1

编 号	电流阻挡层 13 的 Al 的组分比 z_1	电流阻挡层 14 的 Al 的组分比 z_2	p 型敷层 8 的 厚度 $t(\mu\text{m})$
A1	0.53	0.53	0.25
A2	0.55	0.55	0.25

A3	0.59	0.59	0.25
A4	0.70	0.70	0.25
A5	0.70	0.70	0.25

图 2 表示当有效折射率差值不大于 3×10^{-3} 时可实现基本横向模激光所获得的最大光输出功率为不小于 100mw，当有效折射率差值不大于 2.6×10^{-3} 时为不小于 150mw，而当有效折射率差值不大于 2.3×10^{-3} 时为不小于 200mw。

另外，当有效折射率差值不大于 3×10^{-3} ，光输出功率为 100mw 的情况下，得到的激光阈值电流为 43mA，工作电流为 140mA，垂直光束发散角 18° ，水平光束发散角为 7° ；而当有效折射率差值不大于 2.5×10^{-3} ，光输出功率为 170mw 的情况下，得到的激光阈值电流为 45mA，工作电流为 185mA，垂直光束发散角为 18° ，水平光束发散角为 7° 。

当有效折射率差值不大于 2.3×10^{-3} 时，若光输出功率为 200mw，则得到的激光阈值电流为 47mA，工作电流为 235mA，垂直光束发散角为 18° ，水平光束发散角为 6.5° 。

这样，当有效折射率差值不大于 3×10^{-3} 时，就能以基本横向模激光在小的工作电流下得到大的光输出功率。

因此，在根据本发明实施例的半导体激光器件中，把有效折射率差值设定为不大于 3×10^{-3} ，且最好不大于 2.6×10^{-3} 。

通过选择电流阻挡层 13 和 14 各自的 A1 的组分比 z_1 和 z_2 、p 型敷层 8 的厚度 t 和条宽 W ，改变在半导体激光器件不工作时的有效折射率差值 Δn （对应于开口的区域 a 内的有效折射率减去对应于开口两侧区域的 b 内的有效折射率），以测量基本横向模激光的最大光输出功率 P_k ，其结果列于表 2。此时，在半导体激光器件的前后面分别配上射率为 2% 和 95% 的反射膜，腔体长度设定为 $1200\mu\text{m}$ ，在 25°C 环境温度下进行测量。样品 B4、B9、B14、B18 和 B21 分别对应于样品 A1、A2、A3、A4 和 A5。

表 2

编 号	Δn	$W(\mu m)$	$P_k(mW)$
B1	0.0023	5.5	110
B2	0.0023	5.1	150
B3	0.0023	4.7	180
B4	0.0023	4.5	200
B5	0.0025	6.0	90
B6	0.0025	5.4	95
B7	0.0025	5.0	120
B8	0.0025	4.8	150
B9	0.0025	4.5	170
B10	0.0025	4.2	200
B11	0.0030	5.7	80
B12	0.0030	5.3	85
B13	0.0030	4.9	90
B14	0.0030	4.5	100
B15	0.0030	4.3	120
B16	0.0038	5.3	55
B17	0.0038	4.9	60
B18	0.0038	4.5	60
B19	0.0050	5.5	45
B20	0.0050	4.9	45
B21	0.0050	4.5	50

5 图 3 表示利用表 2 内编号 B1 - B21 的样品获得的有效折射率差值 Δn 、可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 P_k 以及条宽 W 之间的相互关系。在所有样品 B1 - B21 中获得基本横向模激光。

图 3 表示，为使最大光输出功率 P_k 不小于 100mW，必须选择满足直线 L 下面（包括直线 L）某一区域的条宽 W 和有效折射率差值 Δn ；

为使最大光输出功率 P_k 不小于 150mW, 则必须选择满足直线 M 下面(包括直线 M) 某一区域的条宽 W 和有效折射率差值 Δn .

直线 L 用下式 (A1) 表示:

$$W = 1.6 \times 10^3 \times \Delta n [\mu m] + 9.3 [\mu m] \quad (A1)$$

5 直线 M 用下式 (A2) 表示:

$$W = 1.5 \times 10^3 \times \Delta n [\mu m] + 8.55 [\mu m] \quad (A2)$$

在该半导体激光器件中, 当半导体激光器件工作时, 由于载流子注入区域 a, 使区域 a 中的有效折射率约减小 10^{-3} . 因此, 为了保持有效折射率导向型结构良好, 有效折射率差值最好不小于 2×10^{-3} .

10 尤其是, 就可靠性而言, 条宽 W 最好不小于 $3.0\mu m$. 具体地说, 为使半导体激光器件的稳定工作时间不少于 1000 小时, 条宽 W 最好不小于 $3.0\mu m$.

如上所述, 为使基本横向模激光的最大光输出功率 P_k 不小于 100mW, 要如此选择条宽 W 和有效折射率差值 Δn 以满足下列关系:

$$\begin{aligned} 15 \quad & \Delta n \geq 2 \times 10^{-3}, \\ & W \leq 1.6 \times 10^3 \times \Delta n [\mu m] + 9.3 [\mu m], \\ & W \geq 3.0 [\mu m] \end{aligned}$$

为使基本横向模激光的最大光输出功率 P_k 不小于 150mW, 除了上述关系外, 最好还要满足下述关系:

$$20 \quad W \leq -1.5 \times 10^3 \times \Delta n [\mu m] + 8.55 [\mu m]$$

带隙大的电流阻挡层(它的 A1 的成分比较大)的结晶性较差, 结果, 在再次生长电流阻挡层过程中, 杂质会从该电流阻挡层扩散入有源层 6. 此外, 为了把半导体激光器件做成一种有效折射率导向型半导体激光器件以减小无效电流, 把 p 型敷层 8 的厚度设定为很小的值, 最好不超过 0.25 μm . 所以, 为了防止上述的扩散现象, 最好把激活层 6 侧面的电流阻挡层 13 做成像本发明实施例中的非掺杂层那样的低杂质层, 更好是做成如上所述的非掺杂层.

在上述第一实施例中, 虽然把 $Al_qGa_{1-q}As$ ($q \geq 0$) 构成的单量子阱结构层用作有源层 6, 但是也可以把由 $Al_qGa_{1-q}As$ 阱层与 $Al_pGa_{1-p}As$ 阻挡层 ($p > q \geq 0$) 构成的多量子阱结构层用作为有源层 6. 另外, 还可以把由 $Al_qGa_{1-q}As$ ($q \geq 0$) 构成的无量子效应层用作为有源层 6.

下面用图 4 和 5 说明根据本发明第二实施例的 AlGaAs 系半导体激光

器件。在图 4 所示的半导体激光器件中，对应于图 1 所示半导体激光器件部分的那些部分采用同样的标号。

在图 4 中，在 n 型 GaAs 衬底 1 上依次形成 0.5 μ m 厚 Se 掺杂 n 型 GaAs 缓冲层 2、0.1 μ m 厚 Se 掺杂 n 型 $Al_sGa_{1-s}As$ 缓冲层 3 以及 2.2 μ m 厚 Se 掺杂 $Al_xGa_{1-x}As$ 敷层 4，其中的 $x>s>0$ 。在本发明实施例中， $s=0.18$ ， $x=0.45$ 。

在 n 型敷层 4 上依次形成 200Å 厚非掺杂的 $Al_vGa_{1-v}As$ 光波导层 5、非掺杂的有源层 6 以及 200Å 厚非掺杂的 $Al_wGa_{1-w}As$ 光波导层 7，其中 $1>x>v$ 。在本实施例中， $v=0.35$ 。通过交替堆迭 80Å 厚由 $Al_qGa_{1-q}As$ 构成的量子阱层 6a 和 80Å 厚由 $Al_pGa_{1-p}As$ 构成的阻挡层 6b，构成有源层 6。这里， $v\geq p>q\geq 0$ ， $w\geq p>q\geq 0$ 。在本实施例中， $q=0.11$ ， $p=0.3$ 。此外， $y_1>w$ ， $y_2>w$ 。在本实施例中， $w=0.35$ 。

在光波导层 7 上形成 $t\mu$ m 厚 Zn 掺杂的 p 型 $Al_{y_1}Ga_{1-y_1}As$ 敷层。在实施例中， $y_1=0.45$ 。

在 p 型敷层 8 近中央部分上依次形成沿垂直方向（沿腔体长度方向）延伸的 200Å 厚条形 Zn 掺杂的 p 型 $Al_uGa_{1-u}As$ 蚀刻阻止层 9、1.8 μ m 厚条形 Zn 掺杂的 p 型 $Al_{y_2}Ga_{1-y_2}As$ 敷层 10 以及 0.7 μ m 厚条形 Zn 掺杂的 p 型 GaAs 盖层 11。p 型蚀刻阻止层 9 的宽度为 $W\mu$ m。宽度 $W\mu$ m 成为形成电流路径的开口的宽度。这里， $1\geq u>y_1$ ， $1\geq u>y_2$ 。在本实施例中， $u=0.7$ ， $y_2=0.45$ 。p 型蚀刻阻止层 9、p 型敷层 10 和 p 型盖层 11 构成了条状脊形部分 12。

在 p 型敷层 8 上依次形成 0.3 μ m 厚非掺杂的 $Al_{z_1}Ga_{1-z_1}As$ 电流阻挡层 13、0.2 μ m 厚 Se 掺杂的 n 型 $Al_{z_2}Ga_{1-z_2}As$ 电流阻挡层 14 以及 0.3 μ m 厚 Se 掺杂的 n 型 GaAs 电流阻挡层 15，从而覆盖住脊形部分 12 的侧表面，其中 $1\geq z_1>y_1$ ， $1\geq z_1>y_2$ ， $1\geq z_2>y_1$ ， $1\geq z_2>y_2$ 。

在 p 型盖层 11 的上表面、非掺杂电流阻挡层 13 的端面、n 型电流阻挡层 14 的端面以及 n 型电流阻挡层 15 的上表面与端面上，形成 6 μ m 厚 Zn 掺杂的 p 型 GaAs 接触层 16。

在 p 型接触层 16 上形成由 Cr/Au 组成的 P 侧电极 17，在 n 型衬底 1 的下表面上刷 Cr/Sn/Au 组成的 N 侧电极 18。

除了有源层 6 的详细结构之外，图 4 和图 1 所示的半导体激光器件的制造方法是相同的。

在该半导体激光器件中, 与 p 型敷层 8 和 10 相比, 具有条形开口(条宽为 W) 以便限制电流路径并形成该电流路径的电流阻挡层 13 和 14 具有较大的带隙和较小的折射率。因此, 在发光区(图 4 中以虚线椭圆表示的区域)内, 可以把对应于开口的区域 a 内的有效折射率做得比对应于开口两侧区域 b 内的有效折射率更大, 这样半导体激光器件就能像有效折射率导向型半导体激光器件那样工作了。

用上述结构, 电流阻挡层 13 和 14 成了对激光光线呈透明的透明的电流阻挡层。

通过选择电流阻挡层 13 和 14 各自的 A1 的组分比 z_1 和 z_2 、p 型敷层 8 的厚度 t 和条宽, 来改变在半导体激光器件不工作情况下的有效折射率差值 Δn (对应于开口区域 a 内的有效折射率 n_a 减去对应于开口两侧区域 b 内的有效折射率 n_b), 以测量可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 P_k , 此时沿水平方向的水平光束发散角 θ_H 、COD (突然光学损坏) 以及像散性。结果列于表 3。在这种情况下, 在半导体激光器件的前后面上分别配上反射率为 12% 和 95% 的反射膜, 腔体长度设定为 $600 \mu m$, 在 $25^\circ C$ 环境温度下作测量。

表 3

编号	t (μm)	A1 的 组分比 $z_1=z_2$	Δn	W (μm)	基本横 向模激 光作用	θ 角度	P_k (mW)	COD (mW)	像散性 (μm)
C1	0.25	0.52	0.0020	4.5	○	5.6	115	190	35
C2	0.23	0.52	0.0024	4.8	○	5.6	95	175	9
C3	0.23	0.52	0.0024	4.0	○	5.5	120	180	7
C4	0.23	0.52	0.0024	3.2	○	5.9	145	185	7
C5	0.22	0.57	0.0028	5.0	○	5.6	70	200	8
C6	0.22	0.57	0.0028	4.3	○	6.0	100	185	6
C7	0.22	0.57	0.0028	3.5	○	6.5	110	180	5
C8	0.22	0.57	0.0028	3.2	○	7.0	120	150	5
C9	0.21	0.57	0.0031	4.6	○	6.1	70	180	7
C10	0.21	0.57	0.0031	3.8	○	7.0	100	170	5

编号	t (μm)	A1 的 组分比 z1=z2	Δn	W (μm)	基本横 向模激 光作用	θ 角度	Pk (mW)	CPD (mW)	像散性 (μm)
C11	0.21	0.57	0.0031	3.3	○	7.2	110	150	4
C12	0.21	0.57	0.0031	2.8	○	7.6	110	140	5
C13	0.21	0.57	0.0031	2.5	○	7.8	100	100	4
C14	0.21	0.57	0.0031	2.0	○	8.1	50	50	3
C15	0.20	0.52	0.0033	4.5	○	6.7	60	180	7
C16	0.20	0.52	0.0033	3.6	○	7.4	95	160	7
C17	0.20	0.52	0.0033	3.2	○	7.5	115	150	4
C18	0.19	0.57	0.0035	4.6	○	7.1	50	175	6
C19	0.17	0.57	0.0040	4.0	×	4.6	0	140	-
C20	0.15	0.57	0.0045	4.0	×	4.2	0	150	-

图 6 表示有效折射率差 Δn 、可实现基本横向模激光时获得的最大光输出功率 Pk、条宽 W 以及采用表 3 中编号 C1 - C18 样品获得的水平光束发散角 θ_H 之间的关系。

5 图 6 表明，为使最大光输出功率 Pk 不小于 70mW，必须选择满足虚线直线 A 与虚线直线 x 之间区域 RA 的条宽 W 与有效折射率差值 Δn ，而为了使最大光输出功率 Pk 不小于 100mW，则必须选择满足虚线直线 B 和上述直线 x 之间区域 RB 的条宽 W 与有效折射率差值 Δn 。

10 图 6 还说明，为使水平光束发散角 θ_H 不小于 6.5° ，必须选择满足实线直线 C 下面（包括直线 C）区域 RC 的条宽 W 与有效折射率差值 Δn ，而为了使水平光束发散角 θ_H 不小于 7° ，则必须选择满足实线直线 D 下面（包括直线 D）区域 RD 的条宽 W 与有效折射率差值 Δn 。

直线 A 由下式（B1）表示：

$$W = -1.33 \times 10^3 [\mu\text{m}] \times \Delta n + 8.723 [\mu\text{m}] \quad (\text{B1})$$

15 直线 B 由下式（B2）表示：

$$W = -1.33 \times 10^3 [\mu\text{m}] \times \Delta n + 7.923 [\mu\text{m}] \quad (\text{B2})$$

直线 X 由下式（B3）表示：

$$W = 2.5 [\mu\text{m}] \quad (\text{B3})$$

直线 C 由下式（B4）表示：

说明书附图

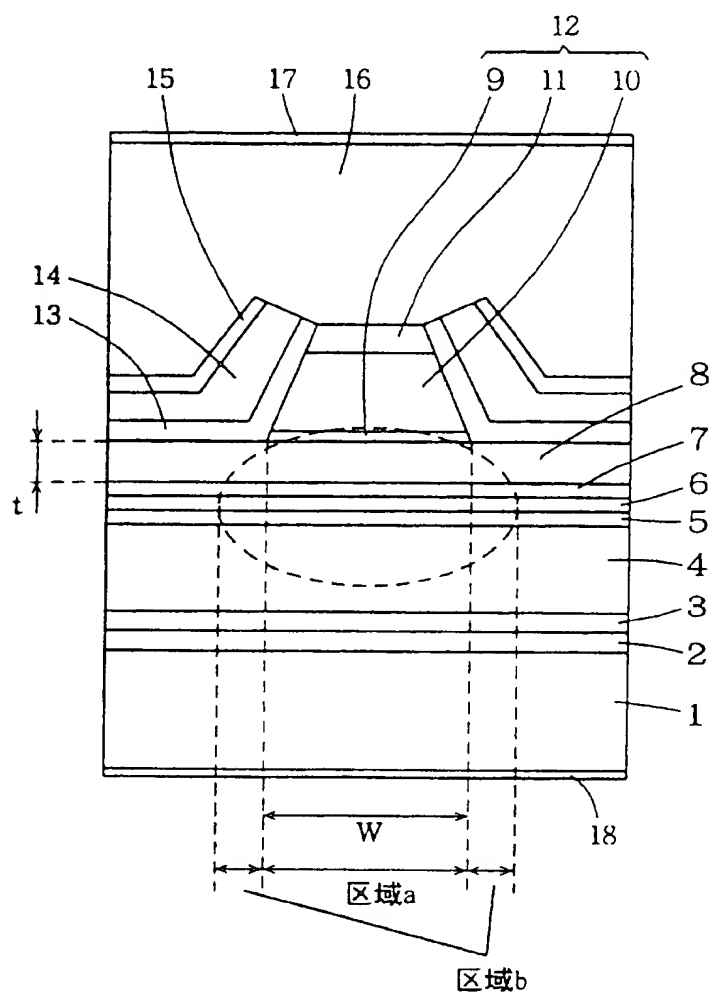


图 1

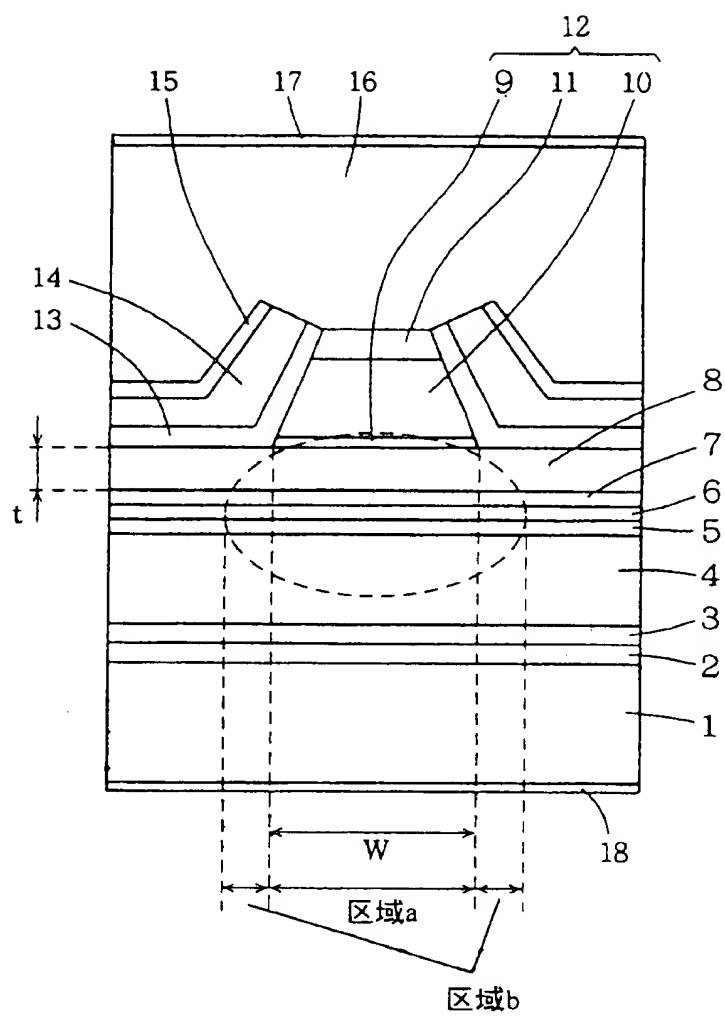


图 4